

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ТРАНЗИСТОРНЫХ МУЛЬТИВИБРАТОРОВ

Л. И. Компаниец, И. Ф. Огороднейчук

Харьков

Применение кремниевых транзисторов позволяет создавать мульти-
вибраторы, обладающие достаточно высокой температурной стабильностью
временных параметров импульсов [1]. При этом практически полностью

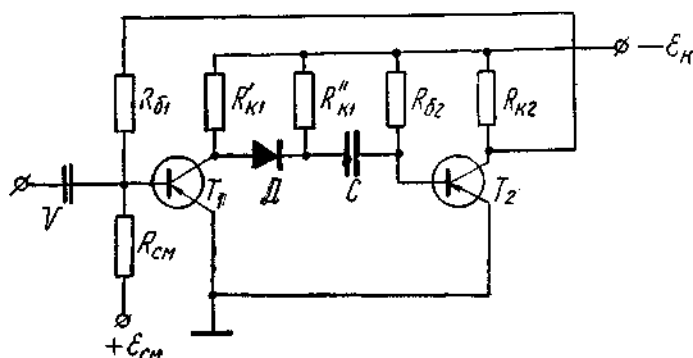


Рис. 1. Ждущий мультивибратор с компенсирующим диодом
в цепи эмиттера.

исключается нестабильность, обусловленная изменением обратных токов переходов при изменении температуры окружающей среды вплоть до $+70 - +80^\circ\text{C}$. Если в схеме применяется высокостабильная времязадающая цепочка, основным источником нестабильности становятся температурные изменения напряжений эмиттерных переходов транзисторов и их коэффициентов усиления по току. Указанная нестабильность может быть существенной, особенно при низких напряжениях питания (6—8 в).

В связи с тем, что полупроводниковые диоды имеют примерно такой же температурный коэффициент напряжения, как и эмиттерные переходы транзисторов ($\text{ТКН} \approx -2 \text{ мВ/град}$), открывается возможность использования их для температурной компенсации длительности импульса.

Рассмотрим одну из возможных схем мультивибраторов с диодной компенсацией (рис. 1). При анализе схемы будем считать, что обратные токи переходов транзисторов T_1 и T_2 равны нулю. Инерционность транзисторов также не будем учитывать, что допустимо для длинных импульсов (единицы миллисекунд и более).

Процесс формирования импульса условно разделим на две стадии. Во время первой стадии происходит перезаряд конденсатора C при закрытом транзисторе T_2 . Когда напряжение на базе транзистора T_2 становится равным $U_{\text{боз}}$, начинается вторая стадия. Появляется ток базы, который возрастает по мере перезаряда конденсатора C . К концу второй

стадии он становится равным $I_{\delta 2}$ и мультивибратор опрокидывается в исходное состояние.

На рис. 2 приведены эквивалентные схемы перезаряда конденсатора C , соответствующие первой (рис. 2, а) и второй (рис. 2, б) стадиям формирования импульса.

Начальное напряжение на конденсаторе

$$U_{co} = (E_k - U_{\delta 02}) \left(1 - \frac{R_{вх2}}{R_{\delta 2} + R_{вх2}} \right), \quad (1)$$

где $R_{вх2}$ — входное сопротивление транзистора T_2 .

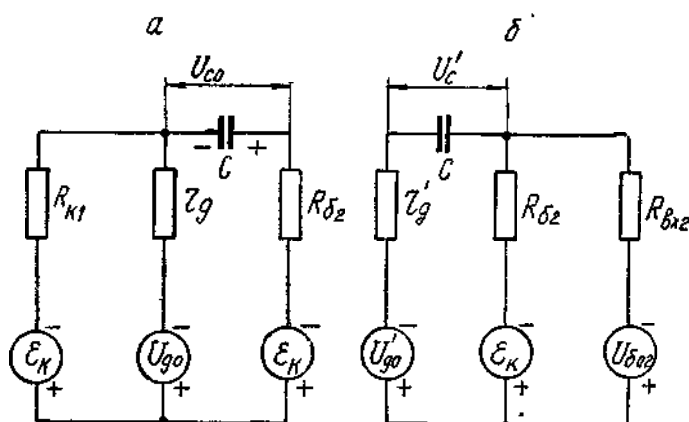


Рис. 2. Эквивалентные схемы перезаряда времязадающего конденсатора:

а — первая стадия; б — вторая стадия.

К концу первой стадии формирования импульса напряжение на конденсаторе

$$U'_c = U'_{до} + (E_k - U_{\delta 02}) \frac{Z'_g}{R_{\delta 2}} - U_{\delta 02}, \quad (2)$$

Здесь

$$Z'_d = Z_d \parallel R_{k1}; \quad (3)$$

$$U'_{до} = \left(\frac{U_{до}}{Z_d} + \frac{E_k}{R_{k1}} \right) Z'_d, \quad (4)$$

где Z_d — динамическое сопротивление диода;

$U_{до}$ — напряжение открывания диода, определяемое по его вольт-амперной характеристике, аппроксимированной ломаной прямой.

Согласно эквивалентной схеме (рис. 2, а), получим выражение для длительности импульса, соответствующей первой стадии формирования,

$$t_{u1} = (R_{\delta 2} + Z'_d) C \ln \frac{E_k - U'_{до} + U_{co}}{E_k - U'_{до} + U'_c}. \quad (5)$$

Обратное опрокидывание мультивибратора происходит при токе базы $I_{\delta 2}$. Можно показать, что при этом напряжение на конденсаторе

$$U''_c = -U'_c - I_{\delta 2} \left[\left(1 + \frac{Z'_d}{R_{\delta 2}} \right) R_{\delta x2} + Z'_d \right]. \quad (6)$$

Тогда, согласно эквивалентной схеме (рис. 2, б)

$$t_{u2} = (R'_{62} + Z'_d) C \ln \frac{E'_k - U'_{до} + U'_c}{E''_k - U'_{до} + U'_c}, \quad (7)$$

где

$$R'_{62} = R_{62} \parallel R_{вх2}; \quad (8)$$

$$E'_k = \left(\frac{E_k}{R_{62}} + \frac{U_{602}}{R_{вх2}} \right) R_{62}. \quad (9)$$

Суммарная длительность импульса

$$t_u = t_{u1} + t_{u2}. \quad (10)$$

Считая температурные измерения напряжений U_{602} и $U_{до}$ равными ($\Delta U_{602} = U_{до}$), из выражений (1), (10) получим ряд формул для определения неустойчивости временных параметров импульсов, обусловленных указанными изменениями,

$$\Delta t_{u1}(U_{602}) = (R_{62} + Z'_d) C [\ln(1 - A_1) - \ln(1 - B_1)]; \quad (11)$$

$$\Delta t_{u2}(U_{602}) = (R'_{62} + Z'_d) C [\ln(1 - A_2) - \ln(1 - B_2)]; \quad (12)$$

$$\Delta t_u(U_{602}) = \Delta t_{u1}(U_{602}) + \Delta t_{u2}(U_{602}); \quad (13)$$

$$\delta t_u(U_{602}) = \frac{\Delta t_u(U_{602})}{t_u}. \quad (14)$$

Здесь

$$A_1 = \frac{\Delta U_{602} a_1}{E_k - U'_{до} + U_{co}}; \quad B_1 = \frac{\Delta U_{602} b_1}{E_k - U'_{до} + U'_c};$$

$$A_2 = \frac{\Delta U_{602} a_2}{E''_k - U'_{до} + U'_c}; \quad B_2 = \frac{\Delta U_{602} b_2}{E''_k - U'_{до} + U'_c};$$

$$a_1 = 1 + \frac{Z'_d}{R_{62}} - \frac{R_{вх2}}{R_{62} + R_{вх2}}, \quad b_1 = 1 + \frac{Z'_d}{R_{62}};$$

$$a_2 = b_2 \frac{Z'_d}{R_{62}} + \frac{R_{вх2}}{R_{62} + R_{вх2}}.$$

Аналогично получим формулы для определения неустойчивости длительности импульса, обусловленной температурным изменением коэффициента усиления по току транзистора T_2 , что проявляется в изменении тока I_{62}

$$\Delta t_{u1}(I_{62}) = 0; \quad (15)$$

$$\Delta t_{u2}(I_{62}) = -(R'_{62} + Z'_d) C \ln(1 - P); \quad (16)$$

$$\Delta t_u(I_{62}) = \Delta t_{u1}(I_{62}) + \Delta t_{u2}(I_{62}); \quad (17)$$

$$\delta t_u(I_{62}) = \frac{\Delta t_u(I_{62})}{t_u}. \quad (18)$$

Здесь

$$P = \frac{\Delta I_{62} \left[\left(1 + \frac{Z'_d}{R_{62}} \right) R_{вх2} + Z'_d \right]}{E''_k - U'_{до} + U'_c}.$$

Общая нестабильность, обусловленная одновременными изменениями $I_{\text{бз}}$, $U_{\text{бз}}$ и $U_{\text{до}}$

$$\Delta t_{u1} = \Delta t_{u1}(U_{\text{бз}}); \quad (19)$$

$$\Delta t_{u2} = (R_{\text{бз}}'' + Z_{\text{т}}') C [\ln(1 - A_2) - \ln(1 - B_2 - P)]; \quad (20)$$

$$\Delta t_u = \Delta t_{u1} + \Delta t_{u2}; \quad (21)$$

$$\delta t_u = \frac{\Delta t_u}{t_u}. \quad (22)$$

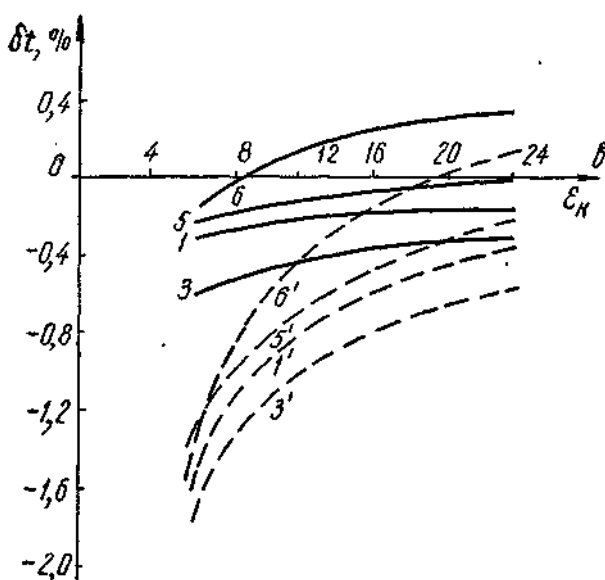


Рис. 3. Экспериментальная зависимость δt_u от E_k при изменении температуры окружающей среды от $+26$ до $+70^\circ\text{C}$:
 ——— мультивибратор с компенсирующим диодом в цепи эмиттера; мультивибратор без компенсации.

Расчет по формулам (1) — (22) показывает, что относительная нестабильность δt_u ($U_{\text{бз}}$) пренебрежимо мала и обычно не превышает $0,02 - 0,03\%$ при $\Delta t^\circ = 50^\circ$ и $E_k = 6 \div 8$ (без компенсации δt_u ($U_{\text{бз}} = 1 \div 1,3\%$)).

При тех же условиях δt_u ($I_{\text{бз}}$) составляет $0,3 - 0,5\%$ при $I_{\text{бз}} = 0,1 - 0,15$ ма. Указанная нестабильность увеличивается при увеличении $I_{\text{бз}}$ (уменьшении $R_{\text{к2}}$).

На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость δt от E_k для мультивибратора с термокомпенсацией (сплошная линия) и без термокомпенсации (пунктир) при изменении температуры окружающей среды от $+26$ до $+70^\circ\text{C}$ для следующих параметров схемы: T_1, T_2 — П104; Д-Д223; $C = 1$ мкф; $R_{\text{к1}} = 3,9$ ком; $R_{\text{к2}} = 6,2$ ком; $R_{\text{б1}} = 9,1$ ком; $R_{\text{б2}} = 36$ ком; $R_{\text{см}} = 15$ ком (нагреву подвергался только диод и транзистор T_2).

Из рис. 3 видно, что мультивибратор с диодной компенсацией имеет стабильность в 3—5 раз более высокую, чем аналогичный мультивибратор без компенсации. Более точная компенсация в ряде случаев оказывается невозможной в основном из-за того, что входные характеристики кремниевых транзисторов даже одного и того же типа изменяются неоди-

наково. В некоторых образцах транзисторов температурный коэффициент напряжения эмиттерного перехода в значительной степени зависит от тока базы. При токах базы, не превышающих 0,1—0,2 мА, ТКН от образца к образцу изменяется незначительно и составляет примерно —

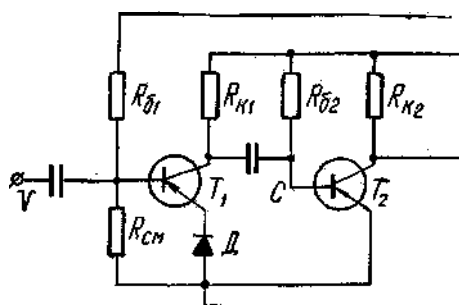


Рис. 4. Ждущий мультивибратор с отключающим диодом.

вреязадающего конденсатора на форму импульса, применяют отключающие диоды (рис. 4). Нетрудно заметить, что отключающий диод в данной схеме одновременно выполняет роль компенсирующего диода. Формулы (1) — (22) справедливы и для этой схемы, если R_{k1} заменять на R_{k1}' .

На рис. 5 приведена схема аналогичного мультивибратора, в котором температурная компенсация происходит с помощью диода, включенного в цепь коллектора транзистора T_1 . При повышении температуры в результате уменьшения падения напряжения на диоде D начальное напряжение U_{co} на конденсаторе C увеличивается, что позволяет скомпенсировать уменьшение длительности импульса за счет уменьшения U_{co2} . Данный мультивибратор имеет температурные характеристики, аналогичные характеристикам мультивибраторов, выполненным по схемам рис. 1 и 4.

Следует также заметить, что во всех рассмотренных схемах мультивибраторов диодная термокомпенсация одновременно способствует уменьшению влияния изменения напряжения источника питания на длительность импульса.

ВЫВОДЫ

1. Применение в схемах мультивибраторов компенсирующих диодов позволяет существенно повысить температурную стабильность временных параметров импульсов.

2 мВ/град. При токах, превышающих 0,3—0,5 мА, ТКН может увеличиваться в полтора—два, а иногда и в большее число раз. В связи с этим температурные изменения начального напряжения на вреязадающем конденсаторе неодинаковые и зависят от входной характеристики конкретного транзистора.

Как известно (1), с целью исключения влияния заряда

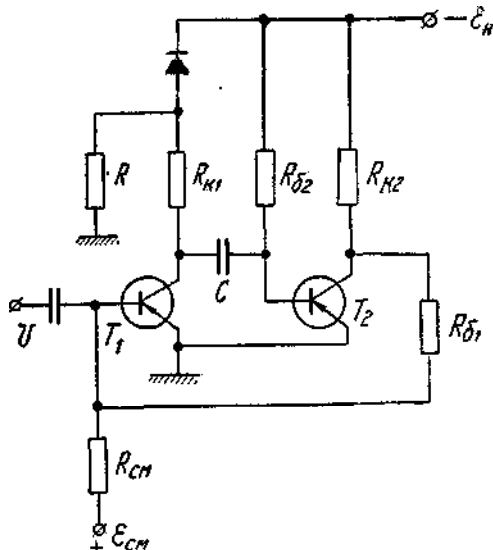


Рис. 5. Ждущий мультивибратор с компенсирующим диодом в цепи коллектора транзистора T_1 .

2. Диодная компенсация является наиболее эффективной при относительно низких напряжениях питания (примерно до 12 в).

3. Для уменьшения влияния изменения коэффициента усиления по току на длительность импульса ток базы транзистора I_b нецелесообразно увеличивать свыше 0,2—0,3 ма. Одновременно при малых токах базы уменьшается разброс температурного коэффициента напряжения база — эмиттер, что также способствует увеличению температурной стабильности.

4. Диодная термокомпенсация может быть использована также в ряде других схем мультивибраторов.
